

文章编号: 1006-2467(2012)01-0142-04+0151

基于虚内键模型的非均质岩石破坏数值模拟

柯长仁^{1,2}, 蒋俊玲², 葛修润^{1,3}

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 湖北工业大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430068; 3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要: 将非均质性引入虚内键模型中, 采用 Monte-Carlo 方法对岩石的非均质性进行赋值, 并对岩石试样的动态破坏过程进行数值模拟. 结果表明, 对于红砂岩而言, 当非均质性系数 $m=5$ 时, 虚内键模型的模拟结果与试验结果具有较好的一致性.

关键词: 虚内键模型; 非均质材料; Weibull 分布; 动态破裂过程; 多尺度

中图分类号: TU 452; O 241 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Heterogeneous Rock Dynamic Fracture Based on Virtual Internal Bond Model

KE Chang-ren^{1,2}, JIANG Jun-ling², GE Xiu-run^{1,3}

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,

Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Civil Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract: Heterogeneity was incorporated into the virtual internal bond, Monte-Carlo method was used to evaluate the heterogeneity of rock, and the numerical simulation of dynamic fracture process of rock sample was then done. The simulation results show that for red stone, when the heterogeneity factor $m=5$, the simulation results of virtual internal bond model agree well with that of the test.

Key words: virtual internal bond (VIB) model; heterogeneity material; Weibull distribution; dynamic fracture process; multiscale

岩石具有内部结构非均质特性, 在外部荷载作用下, 其内部微缺陷的成核、扩展以及相互作用决定了岩石的宏观变形和破裂特性. 对岩石破裂过程的研究已取得了丰硕的成果, 其主要可归纳为连续介质力学模型^[1]和离散模型^[2]两类: 前者是建立在连续基础上的一种理论体系, 在单元划分及缩减自由度方面具有明显优势, 但由于没有考虑材料在微观层次上的微观结构, 在分析单元破坏时需要引入强度破坏准则; 后者在模拟裂纹的生成与扩展方面

具有优越性, 它能再现非连续介质的变形及其破坏的全过程, 但离散单元之间连接参数的确定较难. 文献[3-4]中在模拟固体材料裂纹扩展时提出了虚内键(VIB)模型, 认为连续固体材料在微观上是由离散的质量微粒组成, 微粒之间由一个 VIB 连接, 并根据微粒之间的相互作用推导出了材料的宏观本构方程. 由于 VIB 模型同时具备连续介质模型和离散模型的优点, 因此, 它在模拟材料破坏问题中具有明显的优势.

收稿日期: 2011-02-07

作者简介: 柯长仁(1974-), 男, 湖北省阳新县人, 副教授, 博士生, 目前主要从事岩石力学与工程研究. E-mail: longmanke@163.com.

在 VIB 模型中, 虚拟内连接键的分布密度函数 $D(l_0, \theta, \varphi)$ 和刚度 $U(D)$ 取决于材料的力学性质. 通过引入特殊的 $D(l_0, \theta, \varphi)$, Ganesh 等^[5] 将 VIB 模型推广到各向异性材料, 并针对 VIB 模型的有限元实现而进行了研究^[6]. 另外, Lin 等^[7] 对 VIB 模型的数值求解方法进行了研究; Gao 等^[8] 成功地将该模型应用于纳米生物复合材料的裂纹扩展研究中; Ganesh^[9] 则将该模型应用于混凝土材料的开裂破坏研究中; 在 VIB 模型理论框架内, Zhang 等^[10] 发展了多维虚内键 (VMIB) 模型, 并将切向效应引入了微粒点对之间的相互作用研究中, 使得 VMIB 模型能够计及固体材料泊松比的影响, 因而其应用范围比 VIB 更广泛.

对岩石试件表面形貌的扫描电子显微镜 (SEM) 分析发现^[11], 岩石微裂纹的扩展呈现出张拉破裂的特征, 宏观上的剪切带是由于扩展的细裂裂隙网络变形错动的结果. 笔者曾^[12-13] 将 VIB 模型用于岩石材料破坏的数值模拟研究中并取得了部分成果. 本文在此基础上, 将非均质性引入 VIB 模型中, 以使模型更加符合材料的真实状态.

1 VIB 模型简介

VIB 模型是一种多尺度材料的破坏建模方法, 如图 1 所示.

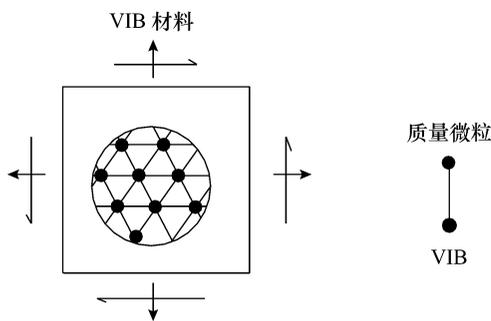


图 1 VIB 模型结构
Fig. 1 Virtual internal bond model structure

在第 1 个层次即有限元网格划分层次上, 它采用连续介质力学模型; 在第 2 个层次即微观上, 将固体材料视为由质量微粒组成, 微粒之间通过 VIB 组成的网络结构而相互作用. 材料宏观本构方程由微粒之间的连接法则导出, 将断裂准则直接嵌入本构方程中而材料单元的破坏不需要另外的强度准则. 根据相关研究结果^[11-12], 材料单元的 4 阶弹性张量为

$$C_{ijgn} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi k \xi_i \xi_j \xi_g \xi_n D(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi \quad (1)$$

式中: k 为 VIB 的刚度系数; $D(\theta, \varphi)$ 为 VIB 的分布

密度; ξ_i, ξ_j, ξ_g 和 ξ_n 为 VIB 方向向量的分量, i, j, g 和 n 为指标变量. 在球形坐标系 (r, θ, φ) 中,

$$\xi = [\sin \theta \cos \varphi \quad \sin \theta \sin \varphi \quad \cos \theta]^T$$

如果代表微元内质点集合体的宏观力学性质等效于相应的连续介质微元, 则

$$k = \frac{15E}{8\pi(1+\mu)} \quad (2)$$

式中, E 和 μ 分别为材料的弹性模量和泊松比.

对于平面应力问题,

$$k = \frac{2E}{(1-\mu)\pi} \quad (3)$$

对于平面应变问题,

$$k = \frac{2E}{(1-2\mu)(1+\mu)\pi} \quad (4)$$

2 材料非均质性的引入

VIB 模型直接由材料的微观结构推导出材料的宏观本构关系而未考虑材料的非均质特性. 为了描述岩石的非均质性, Tang 等^[1] 提出了岩石细观强度满足统计分布的假设, 即假定离散后单元体力学性质呈统计分布, 并开发出了连续介质力学 (RFPA) 模型. 这种方法基于传统的连续介质理论, 不可能在离散的单元层次下进行描述; 而 VIB 模型为在单元以下层次描述材料的非均质性提供了可能. 图 2 示出了 RFPA 模型和 VIB 模型描述岩石非均质性的层次关系.

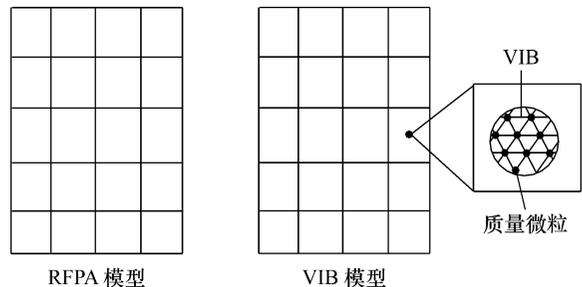


图 2 不同尺度模型的岩石单元
Fig. 2 Rock element at different scale

为了描述岩石的非均质性, 本文引入以下岩石均质度概率密度的 Weibull 分布函数:

$$f(x) = mx^{m-1} \exp(-x^m) \quad (5)$$

式中: m 为分布函数的形状参数, 即非均质性系数; x 为随机变量. 采用 Monte-Carlo 方法对岩石的非均质性进行赋值. 具体方法为: 采用反函数法产生随机数, 即产生 N 个 $(0, 1)$ 区间的均匀分布函数 $U(0, 1)$; 再置 $x = F^{-1}(u)$, 然后返回. 在计算单元刚度矩阵时, 第 i 个单元的弹性张量为 $C_{ijgn}^i = x_i C_{jgn}$.

3 模型建立

为了检验所建 VIB 模型的有效性, 采用前述的思路模拟岩石试样的破坏过程, 试样的制作按照国际岩石力学学会实验室和现场试验标准化委员会制定的标准方案进行. 将试样加工成尺寸 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体, 然后, 利用 MTS815 型刚性材料试验机进行试样的全过程加载试验, 获取试样的材料力学性能参数及破坏模式样本. 在本文的模型中, 采用平面应变三角形单元, 单元数为 900, 节点数为 486. 整个加载过程采取位移控制的加载方式, 每步的加载位移量 $\Delta s = 15 \mu\text{m}$, 加载总步数为 60 步. 由于材料的宏观力学性能取决于微观 VIB 的演化, 本文假定 VIB 的密度演化方程为

$$k = k_0 \exp \left[-c_1 \frac{l}{\epsilon_b} \left(1 + c_2 \frac{\sigma_2}{\sigma_b} \right) \left(1 + \frac{2\sigma_2}{\sigma_b} \right) \right]^4 \quad (6)$$

式中: k_0 为 VIB 初始刚度, 可根据式(2)和(3)确定; $l = |\xi_i \epsilon_i^d \xi_j|$ 为 VIB 的变形量, ϵ_i^d 为偏应变变量; ϵ_b 为材料的单轴抗压应变, 由岩石试样的压缩试验确定; σ_2 为主应力; σ_b 为材料单轴抗压强度; c_1 、 c_2 为模型参数, 表示材料不同的宏观响应特征.

岩石材料的力学性能参数和模型参数分别选为: $E = 27.35 \text{ GPa}$; $\nu = 0.332$; $\sigma_b = 86.03 \text{ MPa}$; $\epsilon_b = 8.623 \times 10^{-3}$; $c_1 = 7.0$; $c_2 = 0.39$. 在本文中, Weibull 分布函数的 $m = 5$, 计算所用岩石均质度概率密度的 Weibull 分布函数曲线见图 3. 在将岩石视为非均质材料的情况下, 模型模拟岩石的裂纹产生、扩展的动态过程(围压为 40 MPa)见图 4.

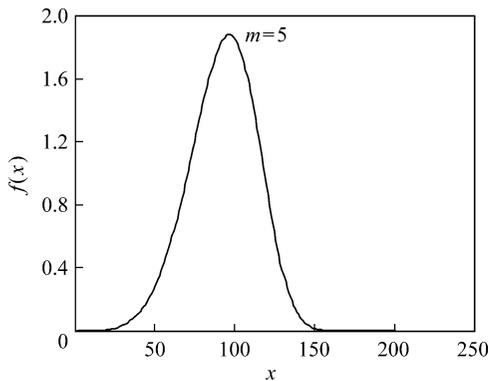


图 3 岩石均质度的概率密度函数分布曲线
Fig. 3 Distribution of probability density of rock sample heterogeneity

由图 3 可以看出, 当 $m = 5$ 时, 岩石比较均匀, 这与图 4 中裂纹在多处产生(第 32 步)、但很快汇合并形成一条主裂缝而导致试样的完全破坏相吻合.

由图 4 可见, 裂纹同时在多个点随机生成, 并开始扩展、汇合而导致整个岩石试样的破坏, 岩石试样的总体破坏形式为剪切破坏. 图 5 (b) 所示为利用 MTS815 型刚性材料试验机所得岩石破坏图. 由图 5 可以看出, 本文的数值模拟结果与试验所得结果较为吻合, 两者的破坏形态均呈现出剪切破坏特征.

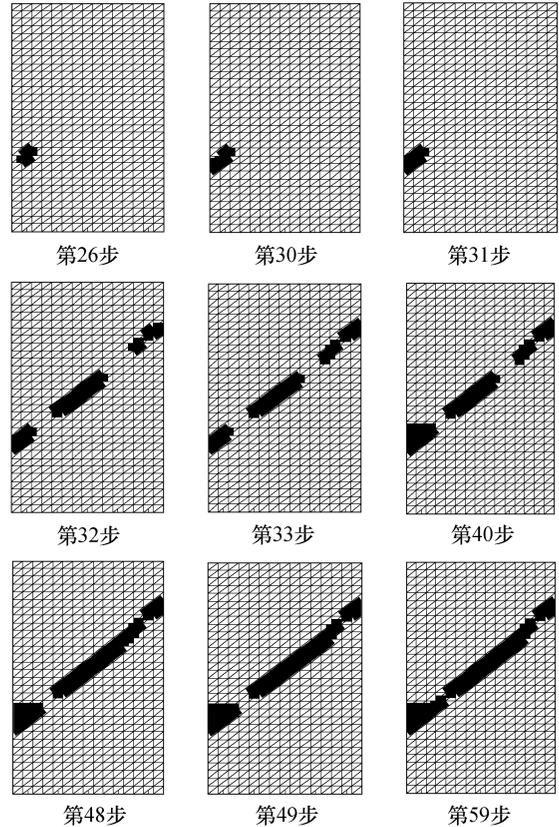
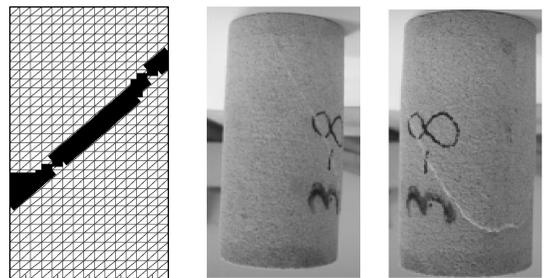


图 4 岩石裂纹的产生和扩展过程

Fig. 4 Dynamic fracture processes of rock sample



(a) 模拟破坏图 (b) 试验破坏图
图 5 岩石破坏形态的对比

Fig. 5 Comparison on fracture of rock sample

图 6 示出了岩石破坏的 5 个阶段, 即应力与加载步(应变)曲线峰后的动态破坏过程. 为了便于观察不同加载步时岩石结构的破坏形态, 并将具有代表性的 5 张破坏图片加在应力与加载步曲线的相应位置上. 由图 6 可见: 当应力与加载步曲线位于峰值

时, 岩石才开始在左下角出现主裂缝并呈活动状态; 在峰后阶段, 随着应力下降及加载步(应变)的持续增加, 岩石的微裂缝逐渐发展并贯通, 直至最终破坏, 破坏时的加载步(第 59 步)是峰值时(第 26 步)的 2 倍多, 应力约为峰值应力的 20%。由此可以看

出, 该种岩石材料从微裂纹的产生到最终破坏经历了一个较长的发展过程, 表明在围压(40 MPa)作用下, 岩石材料具有一定的塑性变形能力, 这对于工程上预防岩石结构破坏具有一定的指导作用。

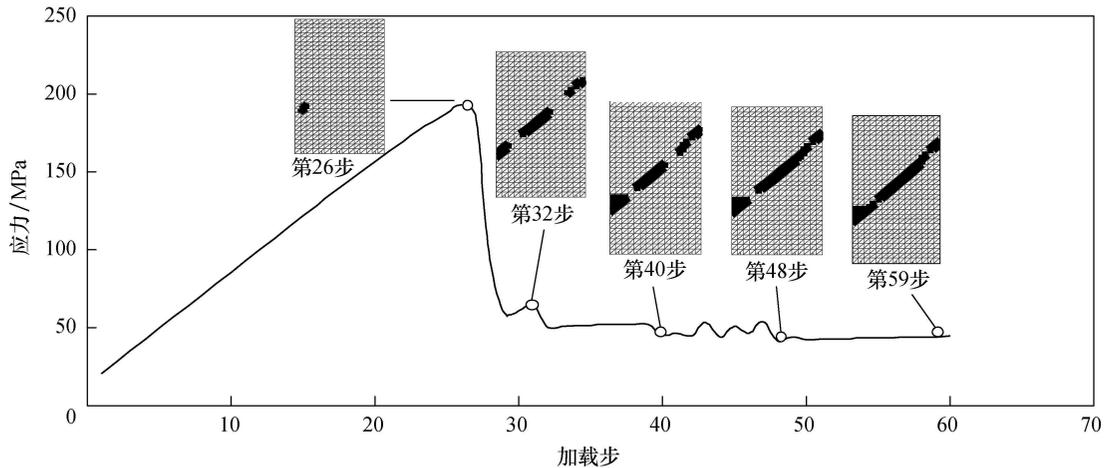


图 6 岩石破坏的 5 个阶段

Fig. 6 Five stages of rock fracture

4 结 论

(1) 运用 VIB 模型对岩石破坏过程的模拟结果与试验结果具有较好的一致性, 从而验证了其用于模拟岩石破坏的可行性。

(2) Weibull 分布能够较好地描述岩石材料的非均质性。对于相对均匀($m=5$)的岩石, 其变形和由此产生的微裂纹在整个试样中呈现出均匀分布。

(3) 在应力与荷载步(应变)曲线的峰值以前, 观察不到微裂纹成核的区域化; 在应力峰值以后, 微裂纹开始形成并呈局部化, 最终形成贯通的宏观裂纹而导致结构的破坏。

参考文献:

- [1] Tang C A, Yang W T, Fu Y F, *et al.* A new approach to numerical method of modeling geological processes and rock engineering problems-continuum to discontinuum and linearity to nonlinearity [J]. **Engineering Geology**, 1998, 49(3): 207-214.
- [2] 邢纪波, 俞良群, 王泳嘉. 三维梁-颗粒模型与岩石材料细观力学行为模拟 [J]. **岩石力学与工程学报**, 1999, 18(6): 627-630.
XING Ji-bo, YU Liang-qun, WANG Yong-jia. 3D beam-particle model for simulating meso-mechanical behavior of rock material [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering** 1999, 18(6): 627-630.
- [3] Gao H J, Klein P. Numerical simulation of crack growth in an isotropic solid with randomized internal cohesive bond [J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 1998, 46(2): 187-218.
- [4] Klein P, Gao H. Crack nucleation and growth as strain localization in a virtual-bond continuum [J]. **Engineering Fracture Mechanics** 1998, 61(1): 21-48.
- [5] Ganesh T, Misra A. Fracture simulation for anisotropic materials using a virtual internal bond model [J]. **International Journal of Solids and Structures** 2004, 41(12): 2919-2938.
- [6] Ganesh T, Hsia K J, Huang Y G. Finite element implementation of virtual internal bond model for simulating crack behavior [J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2004, 71(3): 401-423.
- [7] Lin P, Shu C W. Numerical solution of a virtual internal bond model for material fracture [J]. **Physica D: Nonlinear Phenomena** 2002, 167(2): 101-121.
- [8] Gao H J, Ji B. Modeling fracture in nanomaterials via a virtual internal bond method [J]. **Engineering Fracture Mechanics** 2003, 70(14): 1777-1791.
- [9] Ganesh T. Dynamic fracture simulation of concrete using a virtual internal bond model [J]. **Journal of Engineering Mechanics** 2007, 133(5): 514-522.
- [10] Zhang Z N, Ge X R. A new quasi-continuum constitutive model for crack growth in an isotropic solid [J]. **European Journal of Mechanics A/ Solids** 2005, 24: 243-252.

(下转第 151 页)

4 结 论

(1) 在多遇地震条件下,主要楼层的幕墙加速度放大系数处于1~3,且在塔冠幕墙处突增,4组工况下的幕墙最大加速度放大系数分别为4.48、5.53、4.15和5.15,均符合设计规范的要求。

(2) 在罕遇地震条件下,幕墙的层间位移角在幕墙分区上、下端设备层位置出现了收缩,分区幕墙在中间楼层的层间位移角较大,但均小于玻璃幕墙工程技术规范的限值;幕墙结构在 x 方向的层间位移角大于 y 方向,表明其在 y 方向的刚度较大;在不同工况下,幕墙的最大变形均出现在8区幕墙110~113层。

(3) 在罕遇地震条件下,幕墙支撑结构中应力较大的吊杆位于幕墙曲率较大位置;应力较大的环梁和支撑杆位于限位杆附近;其吊杆均处于弹性状态,部分环梁和支撑杆进入塑性状态,但均未发生破坏。

感谢华东建筑设计研究院有限公司的大力帮助。

参考文献:

- [1] Behr Richard A. Design of architectural glazing to resist earthquake[J] . **Journal of Architecture Engineering** 2006 12(3): 122-128.
- [2] 冯若强, 武岳, 沈世钊. 考虑玻璃参与工作的单层平面索网幕墙结构静力性能研究[J] . **建筑结构学报**, 2005, 26(4): 99-106.
FENG Ruo-qiang, WU Yue, SHEN Shi-zhao. Static performance of single-layer plane cable net glass curtain in consideration of glass panel[J] . **Journal of Building Structures** 2005 26 (4): 99-106.
- [3] Memari Ali M, Behr Richard A, Kremer Paul A. Seismic behavior of curtain walls containing insulating glass units[J] . **Journal of Architecture Engineering** 2003 9(2): 70-85.
- [4] 卢文胜, 黄宝锋, 曹文清. 建筑幕墙振动台试验方法研究[J] . **防灾减灾工程学报**, 2008, 28 (4): 447-453.
LU Wen-sheng, HUANG Bao-feng, CAO Wen-qing. Study on shaking table methods for vibration testing of architectural curtain walls[J] . **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering** 2008, 28(4): 447-453.
- [5] 黄宝锋, 卢文胜, 曹文清. 建筑幕墙抗震性能指标探讨[J] . **土木工程学报**, 2009, 42(9): 8-12.
HUANG Bao-feng, LU Wen-sheng, CAO Wen-qing. Discussion on the seismic performance indices of architectural curtain walls[J] . **China Civil Engineering Journal**, 2009, 42(9): 8-12.
- [6] 李勇, 石永久, 王元清. 单层索网玻璃幕墙与主体结构地震响应的整体分析[J] . **建筑科学**, 2009, 25 (7): 5-10.
LI Yong, SHI Yong-jiu, WANG Yuan-qing. Analysis of the seismic response of single-layer cable net in glass wall coupled with main structure[J] . **Building Science**, 2009, 25(7): 5-10.
- [7] 施菁华, 曹资, 张毅刚. 隐框玻璃幕墙地震反应分析[J] . **工程抗震**, 2000(1): 8-13.
SHI Jing-hua, CAO Zi, ZHANG Yi-gang. Earthquake response analysis of concealed frame glass curtain wall[J] . **Earthquake Resistant Engineering** 2000 (1): 8-13.
- [8] 李承铭. 钢-钢筋混凝土杆系结构三维地震作用下弹塑性时程分析[D] . 上海: 同济大学土木工程学院, 2007.
- [9] 金先龙, 李渊印. 结构动力学并行计算方法及应用[M] . 北京: 国防工业出版社, 2008: 31-39.
- [10] JGJ 102—2003 玻璃幕墙工程技术规范[S] . 北京: 中国建筑工业出版社.
- (上接第 145 页)
- [11] 周维垣, 杨强. 岩石力学数值计算方法[M] . 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [12] 柯长仁, 葛修润. 基于虚内键模型的岩石单轴压缩全过程曲线模拟[J] . **岩土力学**, 2009, 30(5): 1509-1514.
KE Chang-ren, GE Xiu-run. Complete curve simulation of rock under uniaxial compression based on virtual internal bond model [J] . **Rock and Soil Mechanics** 2009, 30(5): 1509-1514.
- [13] KE Chang-ren, GE Xiu-run. Numerical simulation of rock fracturing under uniaxial compression using virtual internal bond model [J] . **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2009, 14(4): 423-428.